

Análise de Propagação de Dispositivos LoRa em Área de Mata Atlântica

Samara Ruthielle da Silva, Gabriel Nascimento Lira, Iviny Maria Silva Cavalcante, Fabrício Braga Soares de Carvalho e Waslon Terllizzie Araújo Lopes

Resumo— Este artigo apresenta uma análise da propagação de sinais de radiofrequência em um ambiente de Mata Atlântica, com o objetivo de implementar uma rede de sensores sem fio LoRa para aquisição e monitoramento de diversos parâmetros ambientais de interesse. As medições foram realizadas utilizando um par de módulos LoRa, responsáveis pela transmissão e recepção dos dados. Os resultados deste estudo envolvem a análise do indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), com o intuito de implementar um *Smart Campus* no Campus I da UFPB (Universidade Federal da Paraíba), em João Pessoa-PB.

Palavras-Chave— LoRa, IoT, Mata Atlântica, Rede de Sensores sem Fio.

Abstract— This paper presents an analysis of the propagation of radio frequency signals in an Atlantic Forest environment, with the objective of implementing a LoRa wireless sensor network for the acquisition and monitoring of several environmental parameters of interest. The measurements were performed using a pair of LoRa modules, responsible for data transmission and reception. The results of this study involve the analysis of the Received Signal Strength Indicator (RSSI), with the aim of implementing a Smart Campus at Campus I of UFPB (Federal University of Paraíba), in João Pessoa-PB.

Keywords— LoRa, IoT, Atlantic Forest, Wireless Sensor Network.

I. INTRODUÇÃO

O avanço digital está ocorrendo de forma contínua e, dessa maneira, o número de pessoas que se conectam à Internet diariamente tem aumentado consideravelmente. A interconexão entre objetos físicos, conhecida como Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), está se tornando onipresente. À medida que novas tecnologias emergem, novas demandas surgem e os padrões de comportamento dos consumidores tendem a se adaptar a essa nova realidade.

Segundo relatório divulgado recentemente pela Associação para Promoção da Excelência do Software Brasileiro (Softex) [1], o Brasil investiu aproximadamente R\$ 322 bilhões em tecnologia somente no ano de 2021, ressaltando sua importância para o progresso das organizações. A digitalização dos processos frequentemente possibilita a prestação de serviços

Samara R. da Silva e Fabrício B. S. de Carvalho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Gabriel N. Lira, Iviny M. S. Cavalcante e Waslon T. A. Lopes, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mails: samara.silva@estudante.cear.ufpb.br, gabrieln.lira@estudante.cear.ufpb.br, iviny.cavalcante@estudante.cear.ufpb.br, fabricio@cear.ufpb.br e waslon@cear.ufpb.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (processos 309752/2022-1 e 309286/2022-0) e pelas Chamadas Internas de Produtividade PROPESQ/UFPB 03/2020, 04/2021 e 06/2021 - código do projeto PIK13426-2020.

que atendem e até superam as expectativas dos clientes, contribuindo para a fidelização e estabelecendo um mercado diferenciado e competitivo.

Atualmente, o conceito de IoT aplicado a cidades inteligentes está sendo adotado com maior frequência. Isso se deve à crescente demanda por dispositivos que facilitem tarefas cotidianas, desde desativar um alarme até automatizar operações domésticas. Além disso, as diversas aplicações da IoT têm o potencial de contribuir com mais de 11 trilhões de dólares americanos para a economia global até 2025 [2].

Nesse contexto, têm surgido diversos padrões e protocolos de comunicação com o objetivo de estabelecer cidades inteligentes e promover a automatização progressiva de cenários ambientais e urbanos. Por meio de sensores e atuadores, é possível controlar remotamente diferentes variáveis. Por exemplo, pode-se criar um sistema com uma rede de sensores para monitorar temperatura, umidade e outros parâmetros ambientais [3]. As formas de integração desses dispositivos são variadas, incluindo Wi-Fi e Bluetooth. Seguindo essa linha de comunicação sem fio, destaca-se a tecnologia de rádio frequência LoRa (*Long Range*), que, ao contrário do Wi-Fi e Bluetooth, oferece maior alcance e baixo consumo de energia.

A. A Tecnologia LoRa®

A evolução da transformação digital tem avançado significativamente. Entre as tecnologias de rede existentes, é importante destacar as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), conhecidas por sua ampla cobertura e baixo consumo de energia. Nesse contexto, a tecnologia LoRa, que utiliza a rede LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), ganha cada vez mais destaque [4].

LoRa é um protocolo de comunicação sem fio por radiofrequência projetado para redes de longo alcance e baixo consumo de energia. Ele opera nas faixas de frequência não licenciadas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Desenvolvido pela Semtech Corporation® e promovido pela LoRa Alliance®, uma associação global sem fins lucrativos composta por grandes empresas, a tecnologia foi lançada em 2015 com o objetivo de desenvolver e padronizar a tecnologia LoRaWAN [5].

As tecnologias amplamente utilizadas no dia a dia, como redes de telefonia celular e Wi-Fi, demandam alta largura de banda, potência e considerável consumo de energia. Em contrapartida, a tecnologia sem fio LoRa atrai a atenção de usuários que buscam otimizar o consumo de energia e de outros recursos [6], mantendo a capacidade de estabelecer

comunicações eficazes a longas distâncias, permitindo assim a análise de dados em tempo real. Em 2023, havia 300 milhões de nós equipados com dispositivos LoRa no mundo, desempenhando um papel crucial no avanço das cidades inteligentes. Nesses ambientes, residências, medidores e diversas infraestruturas inteligentes são amplamente implementadas em escala global, impulsionando um notável crescimento [7].

O contexto deste trabalho é viabilizar a utilização da tecnologia LoRa para implementar o conceito de *Smart Campus*, submetendo os módulos a diferentes ambientes de propagação para a realização de testes de desempenho. Neste caso, o cenário de testes expõe os dispositivos a áreas de vegetação nativa da Mata Atlântica, reunindo análises de desempenho em relação à intensidade do sinal.

II. PROPAGAÇÃO MÓVEL DE RADIOFREQUÊNCIA

O canal de rádio móvel impõe restrições fundamentais ao desempenho dos sistemas de comunicação sem fio. O percurso do sinal entre o transmissor e o receptor pode variar desde uma linha de visada direta até ser significativamente obstruído por edifícios, montanhas e vegetação. Ao contrário dos canais estacionários e previsíveis, os canais de rádio são aleatórios e não permitem uma análise simplificada. Historicamente, a modelagem do canal de rádio tem representado uma das tarefas mais desafiadoras no projeto de sistemas de rádio móvel [8].

Os princípios subjacentes à propagação das ondas eletromagnéticas são diversos, mas geralmente podem ser atribuídos à reflexão, difração e dispersão. A maioria dos sistemas de rádio-celular opera em áreas urbanas, em que a linha de visada entre o transmissor e o receptor é frequentemente obstruída por edifícios altos, resultando em perdas significativas por difração. Devido às múltiplas reflexões em objetos diversos, as ondas eletromagnéticas seguem diversos caminhos de diferentes comprimentos. A interação entre essas ondas ocasiona a distorção dos caminhos múltiplos em uma localização específica, com as intensidades das ondas diminuindo à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta [8].

Torna-se imprescindível, portanto, realizar uma análise dos modelos de propagação, os quais desempenham um papel crucial no desenvolvimento e na otimização de redes sem fio que utilizam tecnologias como LoRa. A disseminação do sinal em uma rede LoRa é influenciada por diversos fatores, incluindo obstáculos no ambiente, características topográficas, interferências e atributos específicos dos transceptores LoRa. Portanto, neste capítulo serão examinados o modelo de espaço livre (Friis) e alguns modelos de regressão.

A propagação do sinal em uma rede LoRa é afetada por diversos fatores, incluindo obstáculos no ambiente, características topográficas, interferências e propriedades específicas dos transceptores LoRa. Portanto, nesta seção, serão examinados alguns modelos de propagação.

A. Modelo de Propagação no Espaço Livre

Esse modelo de propagação é empregado para prever a intensidade com que um sinal transmitido alcança seu receptor quando ambas as extremidades da conexão mantêm uma linha de visão direta, sem obstruções, garantindo que a propagação

eletromagnética não seja afetada por fenômenos como absorção, reflexão, refração ou difração [9].

A potência recebida por uma antena receptora no espaço livre, quando está separada de uma antena transmissora irradiando a uma certa distância, é determinada pela equação de perdas em espaço livre de Friis [8], dada por

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \quad (1)$$

em que P_t representa a potência transmitida, P_r é a potência recebida, G_t refere-se ao ganho da antena transmissora, G_r indica o ganho da antena receptora, d representa a distância entre as antenas em metros, λ representa o comprimento de onda em metros e L é o fator de perda do sistema ($L \geq 1$).

Os valores de P_t e P_r devem estar na mesma unidade, enquanto G_t e G_r são grandezas adimensionais. As perdas variáveis L ($L \geq 1$) geralmente são atribuídas à atenuação da linha de recepção, perdas de filtro e perdas da antena no sistema de comunicação. Um valor de $L = 1$ indica ausência de perdas no hardware do sistema. A Equação (1) mostra que a potência recebida diminui conforme o quadrado da distância de separação entre a transmissão (Tx) e a recepção (Rx).

B. Modelos de Regressão

Os modelos de regressão são utilizados para estimar as perdas de propagação no canal, como as regressões exponencial e geométrica. Os parâmetros desses modelos são determinados por meio de técnicas de minimização, nas quais um conjunto de dados experimentais é utilizado para minimizar o erro entre os valores calculados e os medidos. Com esses dados, é possível identificar qual tipo de curva melhor se ajusta aos dados experimentais [10].

1) *Regressão Exponencial*: Na regressão exponencial, a relação entre a distância e potência recebida é

$$d_{REX} = ae^{bS}, \quad (2)$$

em que d_{REX} é a distância em metros (m) e S é a potência recebida em dBm.

2) *Regressão Geométrica*: Na regressão geométrica, a relação entre a distância e a potência recebida é

$$d_{RPO} = aS^b, \quad (3)$$

em que d_{RPO} é a distância em metros (m).

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia experimental desenvolvida para efetivar a conexão entre os módulos LoRa. Em seguida, é descrita como foi realizada a implementação experimental na área de Mata Atlântica, localizada no Jardim Botânico Benjamim Maranhão (JBBM), na cidade de João Pessoa-PB.

A. Metodologia

Para o estabelecimento da rede LoRa, foram implementados dois módulos: um módulo de transmissão e um módulo de recepção, com o objetivo de validar a comunicação entre os dispositivos. O módulo de recepção foi definido como estacionário, responsável por receber os dados coletados e armazená-los na nuvem do dispositivo ao qual estava conectado. O módulo de transmissão, por sua vez, ficava em movimento e era utilizado para registrar e enviar o indicador de intensidade do sinal.

1) *Módulo de Transmissão*: A transmissão das variáveis presentes no sistema é atribuída a este módulo, que inclui a placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO e o módulo LoRa. Esta parte do sistema é responsável pela emissão dos dados enquanto é posicionada em diferentes pontos ao longo da trilha selecionada, com o objetivo de avaliar o desempenho dos componentes e o alcance do módulo LoRa. O módulo é alimentado por uma bateria externa. Os dados transmitidos são enviados ao receptor, fixado em um local predeterminado, e então armazenados em um banco de dados.

2) *Módulo de Recepção*: O módulo responsável por receber e registrar os dados provenientes dos testes é composto por uma combinação da placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO e o módulo LoRa. Este módulo é alimentado através de uma conexão USB a um notebook, permitindo a gravação dos dados coletados. Posteriormente, esses dados serão processados e analisados.

É importante destacar que, nesta fase de testes, os módulos são idênticos em termos de componentes, pois a intenção dos autores não foi obter dados relacionados a sensores ou outras variáveis. Esses elementos podem ser adicionados ao módulo transmissor conforme necessário. A Figura 1 ilustra a montagem do módulo transmissor/receptor.

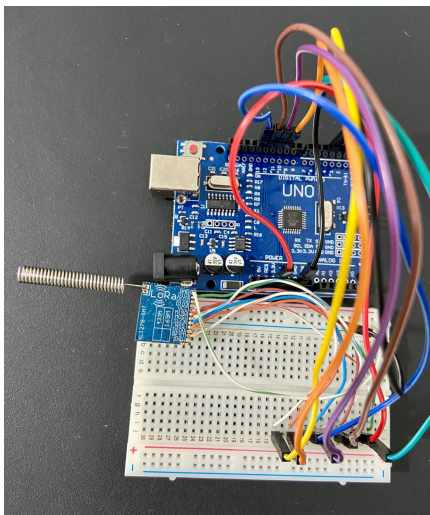


Fig. 1: Módulo Transmissor/Receptor.

A metodologia adotada baseou-se no envio de pacotes em intervalos de 5 segundos em cada ponto de transmissão estabelecido. Em cada ponto, foram enviados dez conjuntos de dados do transmissor para o receptor, possibilitando o cálculo das médias. Nos pontos ótimos, o envio de pacotes ocorria de

maneira eficiente. Os pontos eram medidos a cada 15 metros, verificava-se a conexão entre os módulos e prosseguia-se até que a conexão fosse perdida.

Para estabelecer a rede LoRa, foram conduzidos experimentos com os módulos implementados, visando confirmar a eficácia da tecnologia. Essas atividades experimentais envolveram medições práticas em diferentes condições ambientais, com o propósito de verificar e registrar a intensidade do sinal recebido.

O valor de RSSI representa a intensidade relativa do sinal captado em um ambiente de comunicação sem fio, normalmente expressa em dBm. O RSSI fornece uma indicação do nível de potência que o rádio receptor detecta após a antena, levando em conta possíveis perdas no cabo.

B. Ambiente de Testes Experimentais

Para a realização dos testes, foi escolhido o Jardim Botânico Benjamim Maranhão, uma instituição dedicada à conservação, exibição e pesquisa científica, além de promover programas de educação ambiental e lazer contemplativo. Localizado no bairro da Torre, em João Pessoa-PB, o JBBM é considerado um dos maiores remanescentes de Mata Atlântica natural em área urbana no Brasil. A área possui cerca de 515 hectares, dos quais 343 abrigam o Jardim Botânico [11].

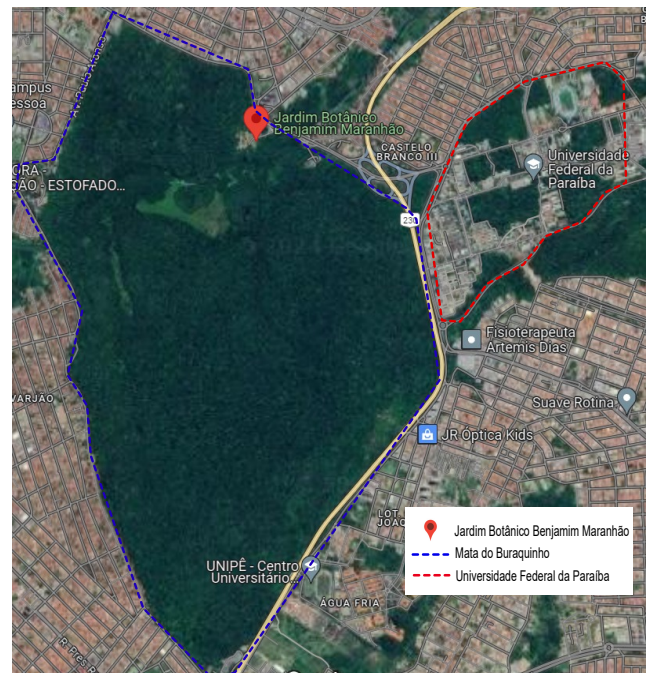


Fig. 2: Jardim Botânico Benjamim Maranhão - Localização via Google Maps.

1) *Cenário 1 - Trilha do Rio*: A Trilha do Rio, com aproximadamente 200 metros, é uma das menores trilhas do JBBM. Foi escolhida como piloto para testes devido à sua característica retilínea, que facilita a padronização das medições iniciais. A vegetação ao longo da trilha, representativa da Mata Atlântica, torna-se progressivamente mais densa à medida que se avança entre os pontos de amostragem. Esse gradiente de densidade vegetal permite a observação detalhada

das transições ecológicas e a avaliação do desempenho dos módulos em condições adversas de coleta de dados. A Figura 3 ilustra o início da trilha correspondente.



Fig. 3: Trilha do Rio.

2) *Cenário 2 - Trilha do Bambuzal*: A Trilha do Bambuzal, com mais de 1 km de extensão, é uma das maiores trilhas do JBBM. Seu início, ilustrado na Figura 4, possui características semelhantes às da Trilha do Rio, com vegetação mais aberta e um percurso retilíneo. À medida que se avança, o trajeto adquire novas direções e a vegetação torna-se progressivamente mais densa.

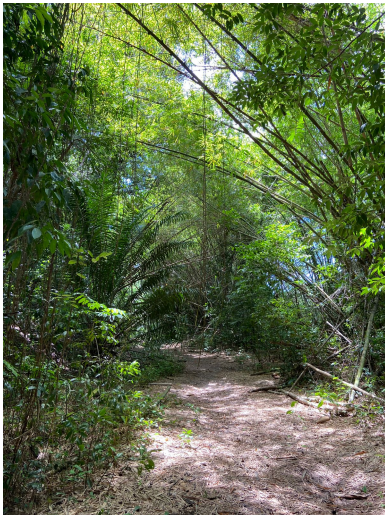


Fig. 4: Trilha do Bambuzal.

Essa mudança gradativa nas condições ambientais foi essencial para monitorar o desempenho dos módulos à medida que eram expostos a diferentes variáveis. Apesar do início semelhante ao teste anterior, as mudanças subsequentes permitiram avaliar os módulos sob condições operacionais mais variadas.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados dos testes experimentais descritos anteriormente, com uma análise detalhada

de cada cenário selecionado.

A. *Cenário 1 - Trilha do Rio*

Conforme descrito na seção anterior, neste cenário o receptor foi estacionado em um ponto fixo, enquanto o transmissor foi deslocado a cada intervalo de aproximadamente 15 metros ao longo da rota predefinida. A Figura 5 representa os pontos de medição ao longo do percurso. O marcador verde indica a posição do receptor, enquanto o marcador azul indica a posição do transmissor em cada ponto medido. É essencial destacar que a quantidade de pontos de medição foi restrita devido à extensão da trilha em questão.



Fig. 5: Pontos de medição – Cenário 1.

Conforme destacado anteriormente, à medida que o módulo transmissor se distancia do módulo receptor, verifica-se que a potência do sinal recebido diminui gradativamente.

A Fig. 6 apresenta os resultados referentes à potência recebida (dBm) em função da distância para a Trilha do Rio. As curvas foram obtidas por meio da utilização do Algoritmo de Marquardt-Levenberg [12] para minimização não-linear do erro médio quadrático entre os dados experimentais e as curvas de regressão. Para este conjunto de dados, os valores de erro médio quadrático foram 15,85%, 10,86% e 10,57% para os modelos de Friis, regressão exponencial e regressão geométrica, respectivamente.

B. *Cenário 2 – Trilha do Bambuzal*

Seguindo a mesma metodologia do cenário 1, o receptor foi posicionado em um ponto fixo enquanto o transmissor foi deslocado a intervalos de aproximadamente 15 metros ao longo da rota predefinida. A Figura 7 mostra os pontos de medição: o marcador verde indica a posição do receptor, e o marcador azul, a posição do transmissor.

Os dados coletados demonstram o desempenho satisfatório da comunicação entre os módulos. Mesmo com mudanças nas condições à medida que a distância aumentava progressivamente, a potência do sinal manteve-se em um patamar adequado à transmissão. O gráfico resultante está representado na Fig. 8. Da mesma forma que na Fig. 6, as curvas foram obtidas por meio da utilização do Algoritmo de Marquardt-Levenberg [12] e, para este conjunto de dados, os valores

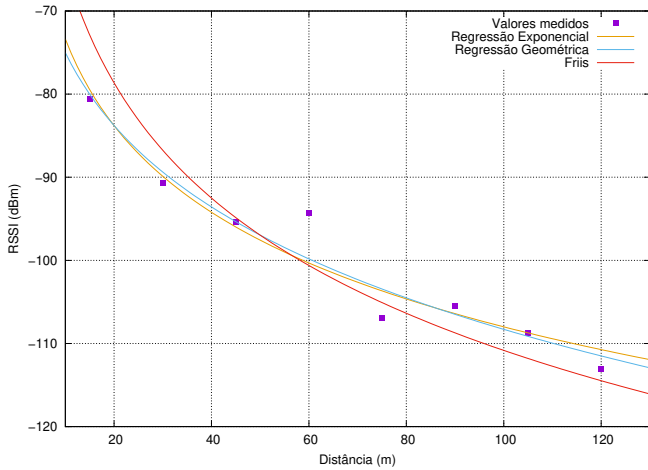


Fig. 6: Potência do sinal recebido em função da distância para a Trilha do Rio.

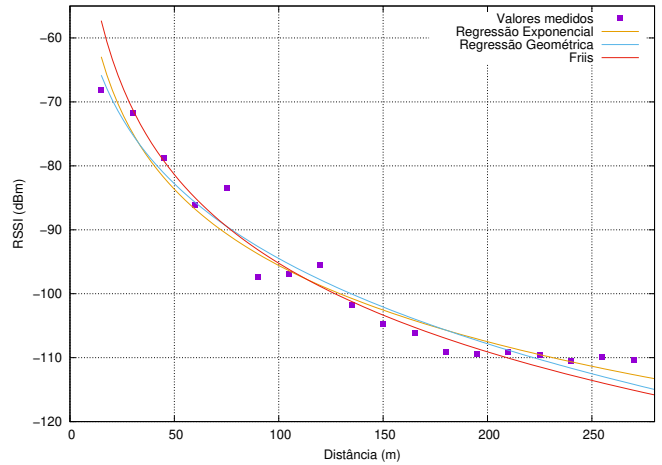


Fig. 8: Potência do sinal recebido em função da distância para a Trilha do Bambuzal.



Fig. 7: Pontos de medição – Cenário 2.

de erro médio quadrático assintótico foram 13,25%, 5,52% e 5,79% para os modelos de Friis, regressão exponencial e regressão geométrica, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os resultados iniciais referentes à transmissão LoRa em um ambiente de Mata Atlântica. A obtenção de dados de locais remotos, como florestas, apresenta uma dificuldade significativa que impacta diretamente o acompanhamento desses recursos naturais. A tecnologia LoRa destaca-se como uma solução promissora, pois viabiliza a transmissão de dados em longas distâncias sem necessitar de uma infraestrutura de telecomunicações complexa. Através da análise preliminar dos dados, observa-se que a propagação nos ambientes de trilhas são melhor modelados por modelos de regressão exponencial e geométrica.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se implementar novos nós sensores para ampliar a cobertura da área do Jardim Botânico de João Pessoa e avaliar mais detalhadamente as características da transmissão LoRa em um cenário de vegetação de Mata Atlântica. Além disso, busca-se automatizar o recebimento dos dados, permitindo que o receptor envie as informações diretamente para a nuvem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Jardim Botânico de João Pessoa Benjamin Maranhão (JBBM) pela autorização da realização de medições experimentais em suas dependências.

REFERÊNCIAS

- [1] Softex. *Indústria de Software e Serviços de TIC no Brasil: Caracterização e Trajetória Recente*, 2022.
- [2] K. Rose, S. Eldridge and L. Chapin. “The Internet of Things: An Overview”. *The internet society (ISOC)*, vol. 80, no. 15, pp. 1–53, 2015.
- [3] T. Í. O. de Medeiros, Y. P. M. Rodriguez, F. B. S. de Carvalho, C. P. de Souza and P. H. M. de Andrade. “Vegetation encroachment monitoring system for transmission lines using wireless sensor networks”. In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1–5. IEEE, 2018.
- [4] F. P. Correia, S. R. d. Silva, F. B. S. d. Carvalho, M. S. d. Alencar, K. D. R. Assis and R. M. Bacurau. “LoRaWAN Gateway Placement in Smart Agriculture: An Analysis of Clustering Algorithms and Performance Metrics”. *Energies*, vol. 16, no. 5, pp. 2356, 2023.
- [5] L. Alliance. “LoRa”. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>. Acesso em: 22 maio 2024, 2022.
- [6] E. L. de Medeiros, F. B. S. de Carvalho, J. M. M. Villanueva, C. da Silva Moreira and C. A. de Souza Filho. “Data acquisition system using hybrid network based on LoRa for hydraulic plants”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–12, 2021.
- [7] L. Semtech. “Semtech”. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora>, 2024. Acesso em: 22 maio 2024.
- [8] T. Rappaport. *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas*. Pearson Universidades, 2008.
- [9] O. A. M. D. Paoli. “Localização em Redes GSM I: Modelos de Propagação”, 2016. Acesso em 20 de maio de 2024.
- [10] C. M. Sobrinho, F. Madeiro, M. S. Alencar and W. T. A. Lopes. “Modelo empírico de previsão de perdas em ambientes fechados”. *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt’09)*, Blumenau, SC, Setembro, 2009.
- [11] Sudema. “Jardim Botânico Benjamin Maranhão”. Disponível em: <https://sudema.pb.gov.br/servicos/servicos-ao-publico/jardim-botanico>. Acesso em: 20 maio 2024.
- [12] J. J. Rubio. “Stability Analysis of the Modified Levenberg–Marquardt Algorithm for the Artificial Neural Network Training”. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 3510–3524, 2021.